

Paris 1971

ORSAY

Série A

N° d'Ordre :

141

" Mise au point d'une chambre de transpiration
et son application à l'étude de la régulation stomatique. "

ARTICLE PRINCIPAL

recouvrant en partie la thèse de Doctorat Ingénieur
enregistrée au C.N.R.S. sous le Numéro 5996

DJAVANCHIR Aziz

Soutenue le 16 Juin 1971 à la Faculté des Sciences d'Orsay
devant le jury :

MM. LEMEE) Président

ULRICH }
CHARTIER } Examineurs



NOTE TECHNIQUE

MISE AU POINT D'UNE CHAMBRE DE TRANSPIRATION POUR MESURER LA RÉSISTANCE STOMATIQUE

A. DJAVANCHIR

*Station Centrale de Bioclimatologie
I.N.R.A. - Versailles **

RÉSUMÉ

Une chambre de transpiration destinée à la mesure de la résistance stomatique des feuilles, inspirée de celle décrite par Van BAVEL, est présentée dans cet article. L'originalité du montage réside essentiellement dans l'introduction des mesures de température de la sonde et de température de la feuille placée dans la chambre. La précision d'une mesure passe de 50 % à moins de 10 % grâce à cette modification. La méthode d'étalonnage utilisée est décrite d'une manière détaillée. Les variations de la résistance stomatique de feuilles de blé *in situ* en fonction de l'éclairement sont fournies à titre d'exemple.

SUMMARY

A transpiration chamber used for measuring the stomatal resistance of leaves is described in the present paper. This apparatus is derived from the Van BAVEL meter. Thermistors or thermocouples have been introduced to measure lithium chloride sensor temperature and temperature of the leaf placed inside the chamber. These temperature measurements contribute to improving the stomatal resistance meter. The precision is now less than 10 % instead of 50 % with air temperature measurement only. The calibrating method is largely presented. Some experimental results concerning the variations of stomatal resistance of wheat leaves against irradiance are given.

1. — INTRODUCTION

La transpiration, l'assimilation chlorophyllienne et la respiration des feuilles sont conditionnées par les échanges gazeux (vapeur d'eau, CO_2 , O_2) entre ces feuilles et le milieu ambiant. Sur ces trajets, on peut distinguer deux étapes : d'une part les cavités sous-stomatiques et les stomates, d'autre part la couche limite entourant la feuille. Chacune de ces parties présente une résistance particulière à la diffusion gazeuse. La connaissance de ces diverses résistances est très importante pour étudier

* Adresse permanente : Karadj Faculté Forestière - Iran.

** Cette note constitue l'article principal d'une thèse d'ingénieur-docteur préparée sous la direction du Professeur LEMÉE, laboratoire d'Ecologie Végétale de la Faculté des Sciences d'Orsay.

avec précision les phénomènes biologiques pour une feuille déterminée. La résistance au niveau des stomates varie; ces stomates sont de véritables régulateurs des échanges gazeux. Ils sont très sensibles aux conditions climatiques auxquelles la plante est soumise. Une faible intensité lumineuse, une forte concentration en CO_2 de l'air et une alimentation en eau défavorable conduisent à une fermeture des stomates. Cette fermeture des stomates entraîne une diminution des échanges gazeux d'où une photosynthèse et une productivité réduite. La rapidité et l'hétérogénéité des fluctuations de la résistance stomatique r_s exigent que les mesures soient faites au champ.

Il faut donc un appareil pour déterminer r_s , peu encombrant, autonome, d'emploi facile et dont la durée de mesure soit assez faible pour obtenir des valeurs qui reflètent le plus exactement possible le phénomène de régulation stomatique de la feuille en place.

A côté de cette résistance stomatique r_s on trouve la résistance de l'air (couche limite) r_a ; cette dernière résistance est purement physique et varie avec la vitesse du vent.

Pour définir exactement r_s , il suffit de rappeler que la loi de diffusion des gaz (loi de Fick) a la même forme que la loi d'Ohm relative aux résistances électriques. La résistance à la diffusion d'un gaz (r_s par exemple) est analogue à la résistance électrique; la différence de concentration de l'air en ce gaz est analogue à la différence de potentiel; le flux de gaz (vapeur d'eau par exemple) est analogue à l'intensité électrique. Les expressions reliant ces différentes grandeurs, dans le cas de la vapeur d'eau, sont fournies dans le paragraphe suivant.

Pour simplifier les calculs, toutes les grandeurs seront exprimées en unités MKSA; pour les résistances r_a et r_s il s'agira donc de seconde par mètre (s m^{-1}).

Nous allons voir tout d'abord le principe de la méthode de mesure de r_s , la réalisation de l'appareil, puis l'étalonnage de cet appareil afin de faire correspondre une mesure physique à une valeur de résistance stomatique. Pour terminer, nous indiquerons les résultats de quelques mesures effectuées sur des plantes en conditions naturelles.

2. — INSTRUMENTS ET MÉTHODES DE MESURE

Le principe de cette méthode est dû à WALLIHAN (1964); l'appareillage a été amélioré par VAN BAVEL (1965), puis à la Station de Bioclimatologie de Versailles (I.N.R.A.) où le présent travail a été effectué. Cet article une fois rédigé, nous avons appris que certains résultats confirmant les nôtres avaient été obtenus à la Faculté Agronomique de Gand (LEMEUR, 1970).

2.1. PRINCIPE DE L'APPAREIL.

On laisse transpirer une petite partie de la surface supérieure ou inférieure (fig. 1) de la feuille, dans une chambre qui contient un élément hygroscopique; ce dernier est une résistance électrique imprégnée de chlorure de lithium. On peut, après étalonnage, relier la vitesse de variation de cette résistance électrique à une résistance à la diffusion de la vapeur d'eau au niveau de la feuille (résistance stomatique).

L'instrument lui-même se compose principalement (fig. 1) :

- 1) d'une petite chambre de transpiration dans laquelle est placée la résistance au chlorure de lithium (sonde) qui sert à mesurer l'humidité relative;
- 2) d'une pince permettant de fixer la chambre de transpiration sur la feuille.

Ce dispositif laisse la feuille intacte et en place.

Il permet donc de faire des mesures dans les conditions naturelles. De plus, si les stomates sont ouverts, le temps de mesure ne dépasse pas 30-40 secondes, ce qui est inférieur au temps nécessaire à une fermeture sensible des stomates due à l'obscurité par exemple.

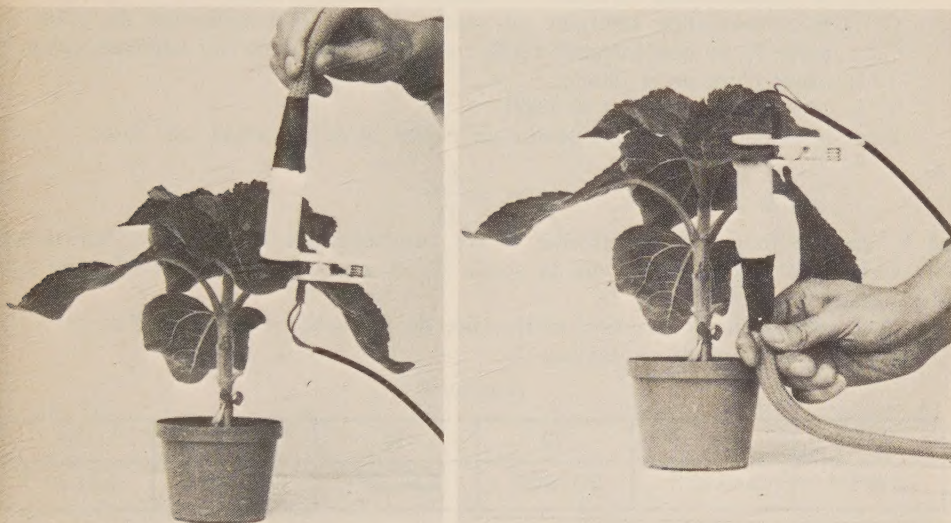


FIG. 1. — Vues de l'appareil (pince et chambre de transpiration).

- a) mesure de la résistance stomatique de la face supérieure;
- b) mesure de la résistance stomatique de la face inférieure.

2.2. PRINCIPE DE LA MESURE.

Avant que la chambre de transpiration ne soit fermée sur la feuille, l'air de cette chambre est desséché jusqu'à une humidité inférieure à h_1 . Après avoir fermé la chambre sur la feuille, on mesure le temps pour passer de l'humidité h_1 à une humidité h_2 ($h_2 > h_1$). Cet intervalle de temps pour passer de h_1 à h_2 dépend de la facilité avec laquelle la vapeur d'eau peut s'échapper de la feuille. Autrement dit, cette mesure est en fait une détermination de la perméabilité de l'épiderme de cette feuille, donc de son degré de régulation stomatique. Il faut absolument tenir compte de l'effet de la température, puisque d'une part les humidités relatives h_1 et h_2 et d'autre part le temps de passage de h_1 à h_2 dépendent à la fois de la température et du degré d'ouverture des stomates. Il faut également noter qu'il existe un gradient de température dans la petite chambre de transpiration.

2.3. DÉTERMINATION DE r_s .

1) Avec un papier buvard on a une évaporation E qui est donnée par la loi de FICK (Gaastra 1959) :

$$E = \frac{C(T_f) - C(T_r)}{r_a}$$

où E est l'évaporation ($\text{kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$)

r_a la résistance à la diffusion dans l'air (m^{-1}s)

$C(T_f)$ la concentration saturante en vapeur d'eau à la température T_f (kg m^{-3})

$C(T_r)$ la concentration saturante en vapeur d'eau à la température du point de rosée T_r , ou concentration réelle en vapeur d'eau dans l'air ambiant (kg m^{-3})

T_f la température de la feuille

T_r la température du point de rosée.

Dans la chambre, pour une feuille de papier buvard humide, on pose :

$$r_a = \frac{L_0}{D}$$

où L_0 est une longueur de diffusion fictive caractéristique de l'appareil (en mètre) elle varie avec la température de la sonde T_s et avec celle de la feuille une fois placée dans la pince T_f (fig. 2).

D le coefficient de diffusion moléculaire de la vapeur d'eau dans l'air (m^2s^{-1}); D varie avec la température (tableau I).

TABLEAU I

$T_a(^{\circ}\text{C})$	15	20	25	30	35
$D\text{m}^2\text{s}^{-1}$	$2,49.10^{-5}$	$2,57.10^{-5}$	$2,65.10^{-5}$	$2,73.10^{-5}$	$2,81.10^{-5}$

Avec le papier buvard, le temps mis pour passer de h_1 à h_2 est $\Delta t'$.

2) Avec une feuille, placée dans la chambre, on a une transpiration T ($T < E$) qui est telle que :

$$T = \frac{C(T_f) - C(T_r)}{r_a + r_s}$$

où r_s est la résistance stomatique (s m^{-1})

T , la transpiration ($\text{kg.m}^{-2}\text{s}^{-1}$).

On pose toujours

$$r_a + r_s = \frac{L_0}{D} + r_s$$

Avec une feuille, le temps mis pour passer de h_1 à h_2 est Δt ($\Delta t > \Delta t'$).

Lorsqu'il y a une résistance stomatique r_s , tout se passe comme s'il fallait ajouter à la chambre, utilisée avec le papier buvard, une rallonge de longueur L , de façon que le temps mis pour passer de h_1 à h_2 soit égal à Δt et non plus à $\Delta t'$. Si l'on admet par ailleurs qu'il y a seulement de la diffusion moléculaire dans la chambre (pas de turbulence) on peut écrire :

$$r_s = \frac{L}{D}$$

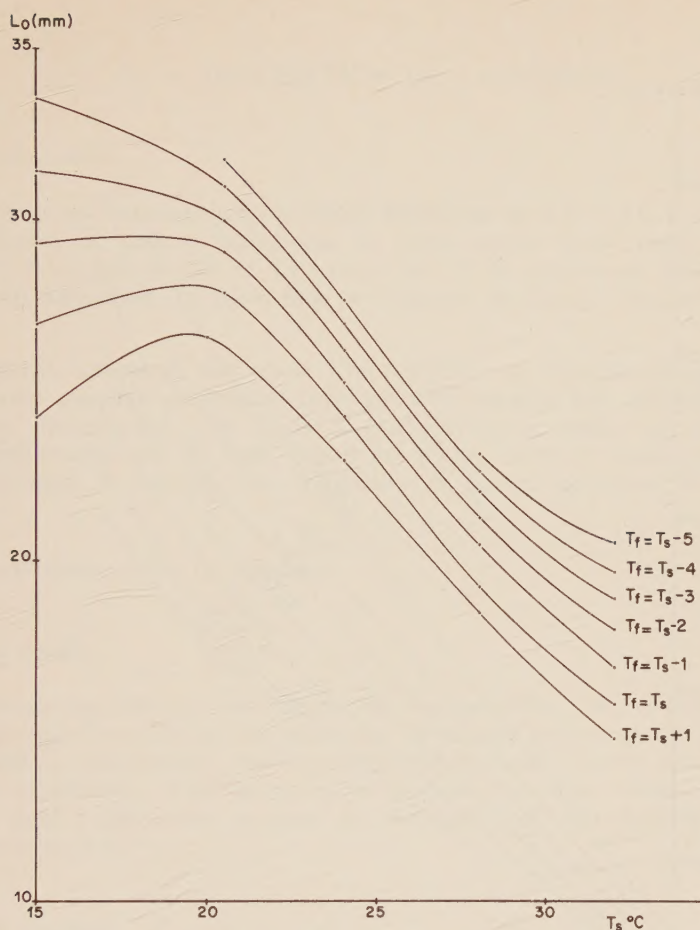


FIG. 2. — Variation de L_0 en fonction de la température.

En abscisses : la température de la sonde, T_s ; le paramètre placé sur chaque courbe indique la valeur de la température de la feuille T_f en fonction de T_s ; courbes d'étalonnage relatives à la thermistance placée contre la feuille.

où L est la longueur réelle de la rallonge ou longueur réelle de diffusion (en mètre). En outre, l'expérience montre que la relation entre L et Δt est linéaire pour un couple de température donné (T_s température de la sonde, T_f température de la feuille).

$$L = S\Delta t - L_0 \quad (1)$$

où S est une constante instrumentale, ayant les dimensions d'une vitesse de diffusion (m s^{-1}) ; elle dépend de la température de la sonde T_s et de celle de la feuille une fois placée dans la pince T_f (fig. 3).

On obtient finalement la relation suivante qui sera utilisée dans toutes les mesures :

$$r_s = \frac{S\Delta t - L_0}{D} \quad (2)$$

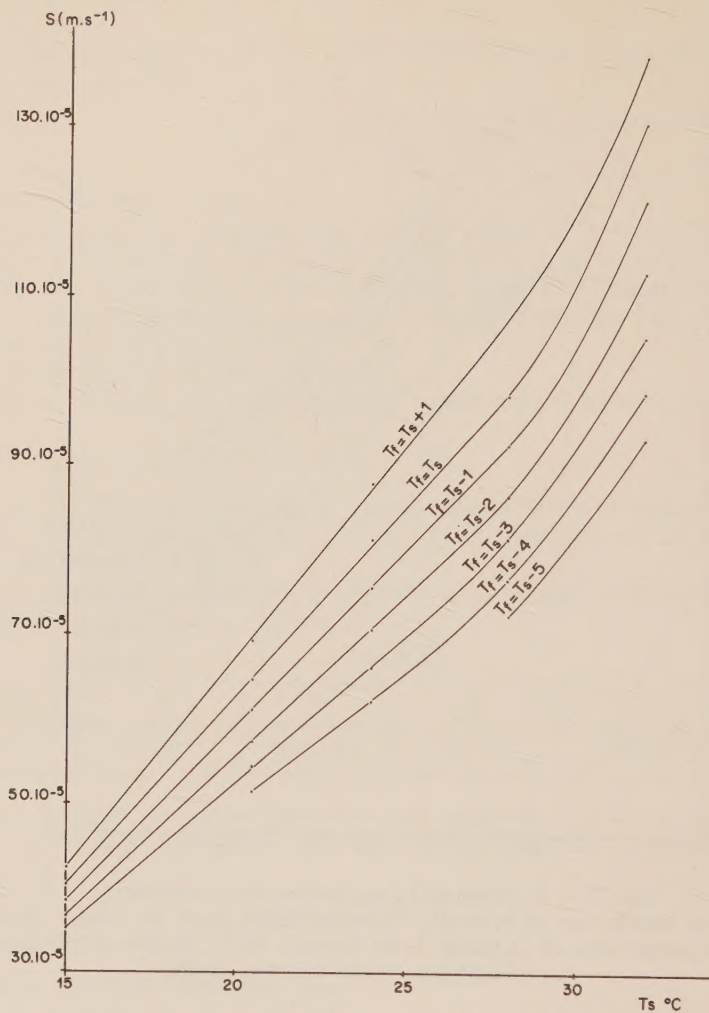


FIG. 3. — Variation de S en fonction de la température.
Cf. légende de la figure 2.

L_o et S sont des fonctions de T_s et de T_f (fig. 2 et 3) déterminées expérimentalement lors de l'étalonnage. L'introduction de deux températures de référence constitue un apport original qui contribue à augmenter sensiblement la précision de l'appareil (§ 4.2).

3. — DESCRIPTION DE L'APPAREIL

3.1. GÉNÉRALITÉS.

L'appareil est constitué par un boîtier métallique de $15 \times 18 \times 20$ cm, d'une petite chambre de mesure hermétique en téflon munie d'une pince et reliée au boîtier par un cordon de 1,40 m. Le cordon de 1,40 m autorise des mesures dans des endroits peu accessibles. Le poids total de l'appareil est de 3,7 kg dont 3,4 kg pour la boîte.

L'appareil comprend une sonde hygroskopique au chlorure de lithium placée dans la petite chambre de mesure; l'appareil étant sensible aux variations de température, une thermistance a été placée à l'intérieur de la sonde, une autre (associée à un thermocouple, lors de cette étude) est placée contre la feuille. Un dispositif permet d'envoyer de l'air sec dans la chambre de mesure au niveau de la sonde.

3.2. LA CHAMBRE AVEC LA SONDE.

3.2.1. *La sonde.*

La sonde au chlorure de lithium est hygroskopique. Sa résistance électrique diminue lorsque l'humidité de l'air augmente. La réponse fournie par un galvanomètre, variable avec la température, reste cependant linéaire entre $2 \mu\text{A}$ et $6 \mu\text{A}$ quelle que soit cette température. C'est pourquoi on a choisi ces deux valeurs. Les mesures consistent donc à déterminer le temps Δt nécessaire pour voir l'aiguille du galvanomètre passer de 2 à $6 \mu\text{A}$.

3.2.2. *La chambre.*

La chambre (fig. 4) est en téflon, matériel non hygroskopique. En effet, pour obtenir un résultat bien précis, il faut toujours éviter qu'il y ait une absorption de l'eau par les matériaux utilisés.

3.3. LA PINCE.

La pince est faite en matière plastique, elle mesure 9,5 cm de long sur 1,8 cm de large (fig. 1 et 4). Lorsque la feuille est dans la pince, l'étanchéité est assurée par deux joints en caoutchouc « Butyl » imperméable aux gaz et n'absorbant pas la vapeur d'eau. Ce caoutchouc est assez souple pour ne pas abîmer la feuille. A la base de la chambre sur le disque en caoutchouc collé sur le bras inférieur de la pince, on a fixé une thermistance au centre et pour cette étude particulière un thermocouple à côté. La forme de l'ouverture faite dans le caoutchouc supérieur de la pince, à la base de la chambre, peut être modifiée selon la forme de la feuille; dans le cas du blé (§ V) on a choisi une fente de 1 cm de largeur.

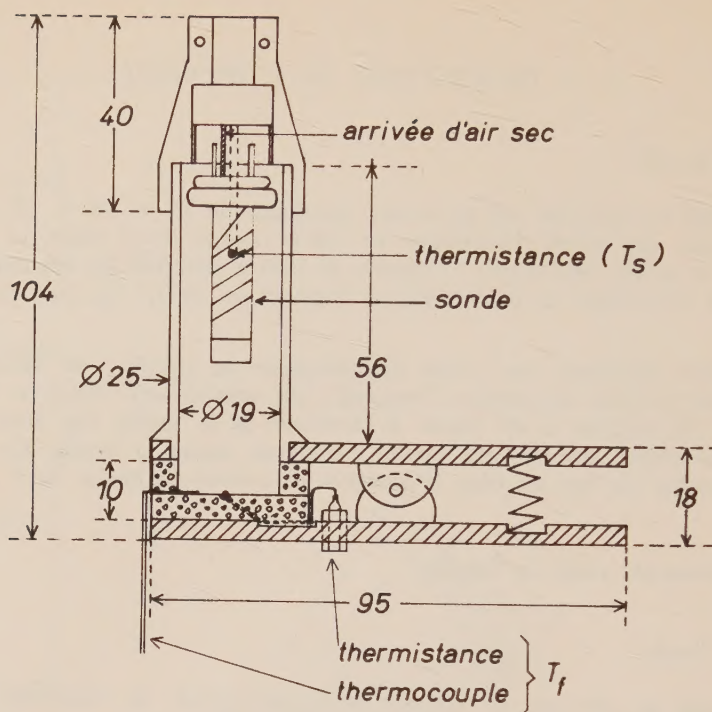


FIG. 4. — Coupe de la pince et de la chambre de transpiration.

3.4. CIRCUIT D'AIR SEC.

A l'aide d'une poire, ou mieux d'une petite pompe (fig. 6) on envoie de l'air extérieur dans la sonde; cet air avant d'arriver passe à travers un récipient rempli de silica-gel pour être desséché. On arrête le pompage lorsque l'indication du cadran est sur $1 \mu A$. Pour obtenir une meilleure répartition et une meilleure homogénéisation, l'air sec est envoyé au-dessus de la sonde (fig. 4), dans la partie supérieure de la chambre, ce qui pouvait conduire à un dessèchement hétérogène de la sonde.

3.5. DISPOSITIF DE MESURE DE LA TEMPÉRATURE.

Un commutateur placé sur la face avant permet de mesurer soit la température de la sonde T_s , soit la température de la feuille T_f à l'aide de deux thermistances.

3.5.1. Température de la sonde T_s .

On utilise une thermistance préalablement étalonnée et placée au centre de la sonde. Elle sert à mesurer la température de l'air au contact de la sonde, soit T_s .

3.5.2. Température de la feuille T_f .

On utilise d'une part une thermistance de même type que celle qui mesure la température de la sonde, d'autre part, pour cette étude particulière uniquement, un thermocouple branché sur un potentiomètre. Les deux thermistances (mesure de la température de la sonde et de celle de la feuille) ont été choisies d'une manière telle que les deux courbes d'étalonnage puissent être confondues lorsque l'on utilise le même circuit électronique de mesure (inclus dans le boîtier).

3.6. CIRCUITS ÉLECTRONIQUES.

Une pile de 24 V alimente le circuit de la sonde; une pile au mercure de 1,4 V alimente le circuit des thermistances. Ceci permet une autonomie complète. La figure 5 et le tableau 2 permettent au lecteur intéressé de monter les circuits électroniques de l'appareil. Ce circuit, inspiré de celui fourni par Van Bavel, a été conçu par G. Guyot (Station de Bioclimatologie de Montfavet (84) - INRA).

TABLEAU II

T 1	2 N 1671 B	R 1	270 Ω	5 %
T 2	2 N 525	R 2	3,8 K Ω	"
T 3	2 N 525	R 3	15 Ω	"
		R 4	10 K Ω	"
		R 5	10 K Ω	"
P 1	0 — 1 K Ω	R 6	220 Ω	"
P 2	0 — 100 K Ω	R 7	10 K Ω	"
P 3	0 — 4,7 K Ω	R 8	10 K Ω	"
P 4	0 — 100 K Ω	R 9	560 Ω	"
P 5	0 — 100 K Ω	R 10	560 Ω	"
		R 11	1 K Ω	"
		R 12	6,8 K Ω	"
D 1	MC 114	R 13	1 M Ω	"
D 2	"	R 14	8,25 K Ω	1 %
D 3	"	R 15	4,42 K Ω	"
D 4	"	R 16	4,42 K Ω	"
		R 17	100 K Ω	5 %
C 1	0,47 μ F			
C 2	10 nF			
C 3	10 nF			

3.7. UTILISATION DE L'APPAREIL.

L'appareil vu de face comporte (fig. 6) :

- un galvanomètre (1) avec une échelle supérieure de 0 à 10 μ A et une échelle inférieure de 10 à 40 °C,

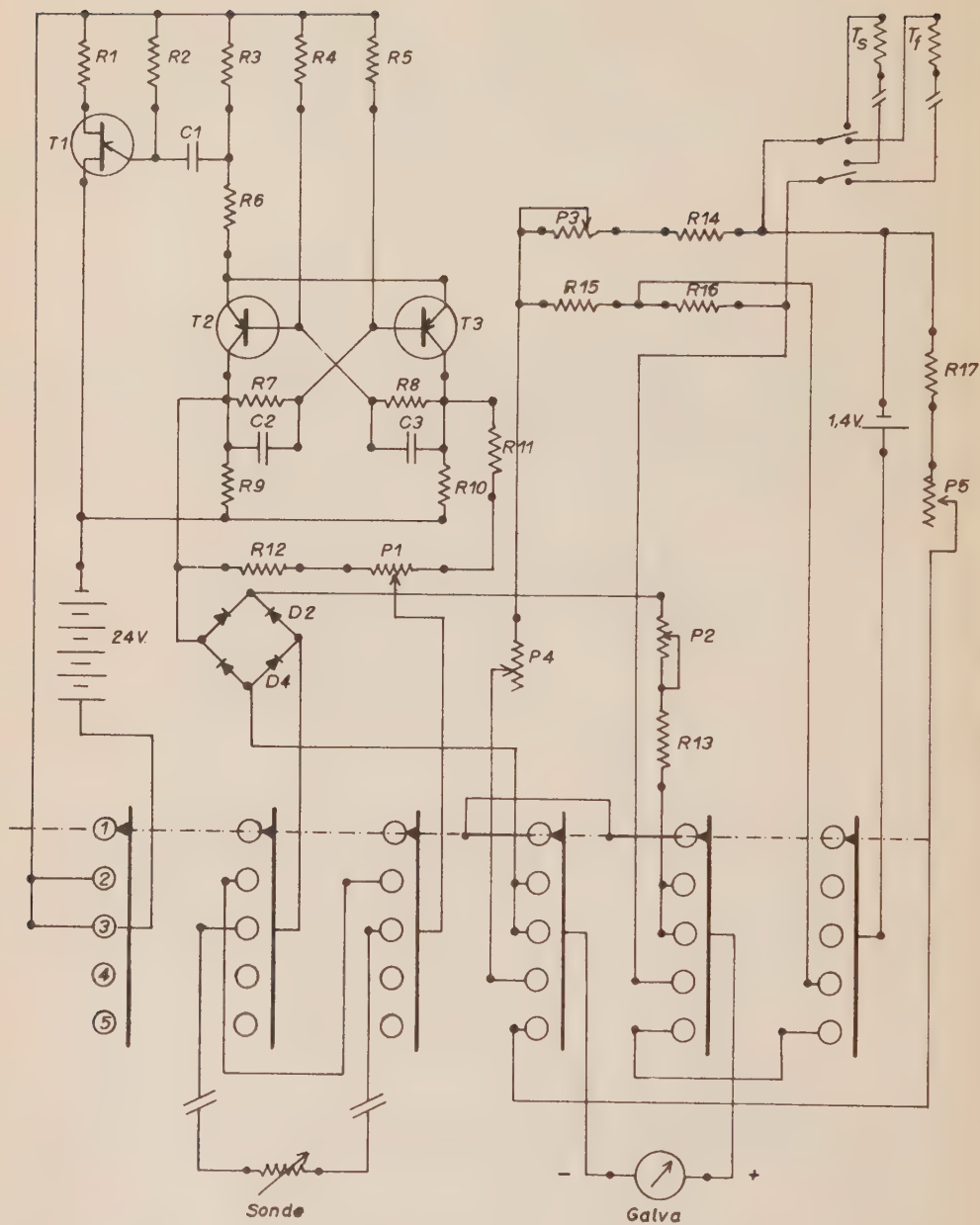


FIG. 5. — Schéma de montage du circuit électrique.

- à droite, des prises pour le raccordement des fils de la sonde (2 et 3), des fils des thermistances (4-5 et 6-7) et le passage de l'air sec (8) vers la sonde.
- au centre, un inverseur (9) permettant de mesurer, soit T_s , soit T_f ,
- à gauche, la prise de branchement de la poire ou la pompe pour l'envoi de l'air extérieur (10) dans le tube de silica-gel qui se trouve dans le boîtier,
- en bas à gauche, le commutateur rotatif à 5 positions qui commande toutes les manipulations (11).

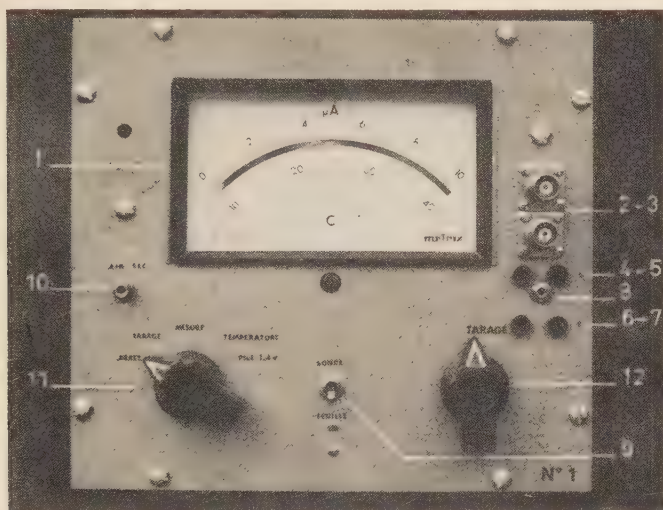


FIG. 6. — Face avant du boîtier de mesure.

1 - Galvanomètre; 2 et 3 - branchement de la sonde; 4 et 5 - branchement de la thermistance (T_s); 6 et 7 - branchement de la thermistance (T_f); 8 - branchement de l'air sec; 9 - inverseur; 10 - branchement pour l'envoi d'air; 11 - Commutateur : position a : arrêt, position b : tarage, position c : mesure, position d : température, position e : vérification pile 1,4 V; 12 - bouton de tarage.

— Position (a) : arrêt; tous les branchements sont hors-circuit; position de non utilisation;

— Position (b) : tarage; la sonde est court-circuitée et la pile de 24 V débite dans le galvanomètre à travers le potentiomètre de tarage (bouton de tarage en bas à droite (12); on règle le galvanomètre sur 10 μA à l'aide du bouton de tarage; cela permet de compenser la diminution du voltage de la pile de 24 V.

— Position (e) : vérification de la pile au mercure (1,4 V); la pile étant branchée sur le galvanomètre, on vérifie qu'elle délivre une tension constante, l'aiguille du galvanomètre est alors sur 10 μA ;

— Position (c) : mesure; on envoie un courant d'air sec dans la chambre de mesure, à l'aide de la poire ou de la pompe pour amener l'aiguille du galvanomètre sur 1 μA (graduation supérieure); ensuite on introduit la feuille dans la pince de mesure; avec un chronomètre gradué au 1/10 de seconde, on mesure le temps que met l'aiguille du galvanomètre pour passer de la position 2 μA à la position 6 μA ;

dans cet intervalle de temps, on mesure les températures T_s et T_f (selon la position de l'inverseur) en passant sur la position (d) la lecture se fait sur l'échelle inférieure du galvanomètre graduée en degrés centigrades. Après utilisation, il est nécessaire de retirer la sonde de la chambre en prenant soin de ne pas toucher au fil métallique qui l'entoure, de la remettre dans son étui et de placer le tout dans un récipient contenant un desséchant.

Remarques.

Si le temps de passage de 2 à 6 μA est long, il est préférable de replacer le commutateur sur la position arrêt afin de ne pas user trop rapidement la pile de 24 volts.

Pour éviter que les écarts des températures dans la chambre soient trop élevés, celle-ci doit être placée à l'ombre lors des mesures.

Les valeurs de T_s et surtout T_f retenues sont les valeurs moyennes entre les températures prises avant et après chaque mesure.

4. — ÉTALONNAGE

4.1. PRINCIPE D'ÉTALONNAGE.

L'étalonnage se fait en utilisant du papier buvard.

On assimile la résistance stomatique r_s (cas de la feuille) à celle résultant d'une longueur supplémentaire de diffusion L (cas du buvard).

Le but de l'étalonnage (§ 23 relations 1 et 2) est de déterminer les valeurs des termes L_0 et S en fonction des températures de la sonde T_s et de la feuille T_f .

4.2. MÉTHODES PRATIQUES ET COURBES D'ÉTALONNAGE.

L'étalonnage doit être effectué en tenant compte à la fois de la température de la sonde (T_s) et de celle de la feuille de papier buvard (T_f). En effet, il existe un gradient entre T_s et T_f car l'évaporation au niveau du buvard abaisse T_f en permanence et parce que l'équilibre de température à l'intérieur de la chambre se fait très lentement par convection naturelle. Or il est évident que la vitesse d'évaporation au niveau de la surface, donc le temps de passage Δt de h_1 à h_2 dépend très largement de la température du papier buvard (T_f) (§ 33 et 352); de même on a vu (§ 321 et 351) que la réponse de la sonde était de son côté une fonction de T_s .

Nous avons fait des mesures en maintenant T_s constant (chambre placée dans une enceinte à température constante) et nous avons obtenu toute une série de points de Δt en fonction de T_f (fig. 7).

Pour obtenir des températures T_f variables, on imbibe le buvard avec de l'eau à une température différente de l'enceinte, en général plus chaude. Puis on introduit

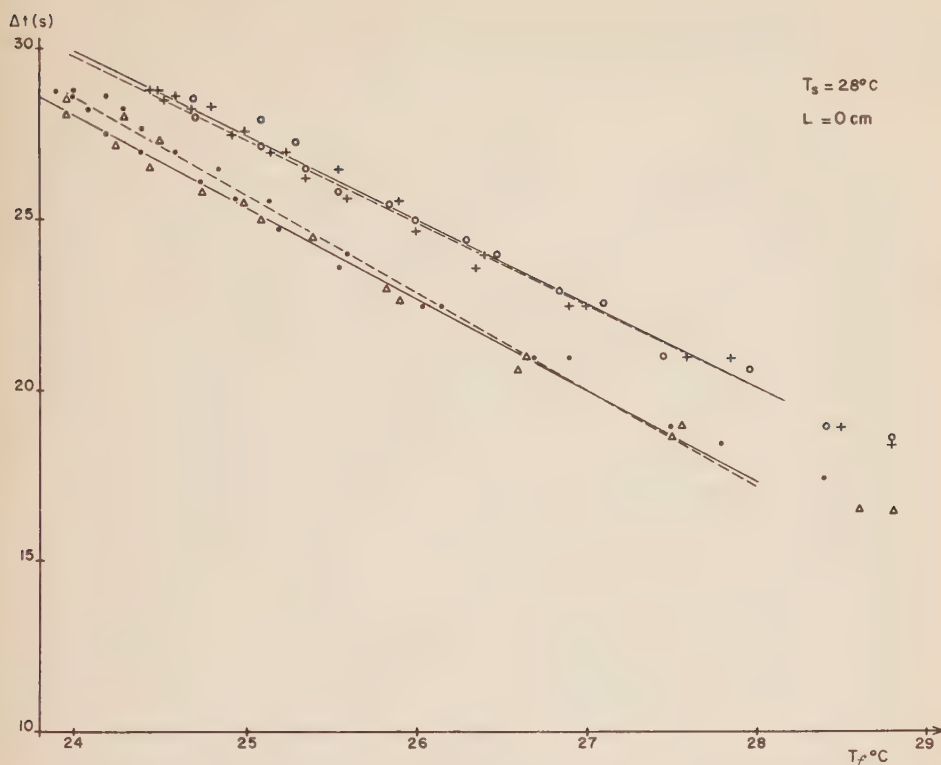


FIG. 7. — Influence de la température de la feuille T_f sur la réponse de l'appareil à température de la sonde T_s constante.

En ordonnées : le temps Δt mis pour passer de h_1 à h_2 (cf. § 22) les valeurs de la température de la sonde et de la longueur de la rallonge employée sont indiquées en haut à droite de la figure. Les points expérimentaux indiqués sont à la base de l'étalonnage; ce dernier nécessite l'obtention de 20 graphiques de ce type environ (4 rallonges à 5 température de la sonde T_s constante).

- | | |
|----------------|--|
| • Thermocouple | --- • Papier buvard situé au-dessous de la sonde |
| + Thermistance | — • Papier buvard situé au-dessus de la sonde |

rapidement ce buvard dans la pince. Par exemple pour $L = 0$ cm et $T_s = 28^\circ\text{C}$ nous avons fait des mesures pour T_f variant de 24 à 29°C qui nous ont conduit à des temps Δt de 16,9 à 29 secondes (fig. 7). La précision d'une mesure est d'environ 4 % si l'on tient compte à la fois de T_s et de T_f , elle est de l'ordre de 50 % si l'on ne considère que la température T_s seule; c'est le cas de la méthode décrite par Van Bavel.

On a représenté le déroulement d'une opération d'étalonnage en portant sur les deux graphiques de la figure 8, en fonction du temps, la variation de la température du buvard T_f d'une part et les indications du galvanomètre traduisant les variations d'humidité dans la chambre, d'autre part.

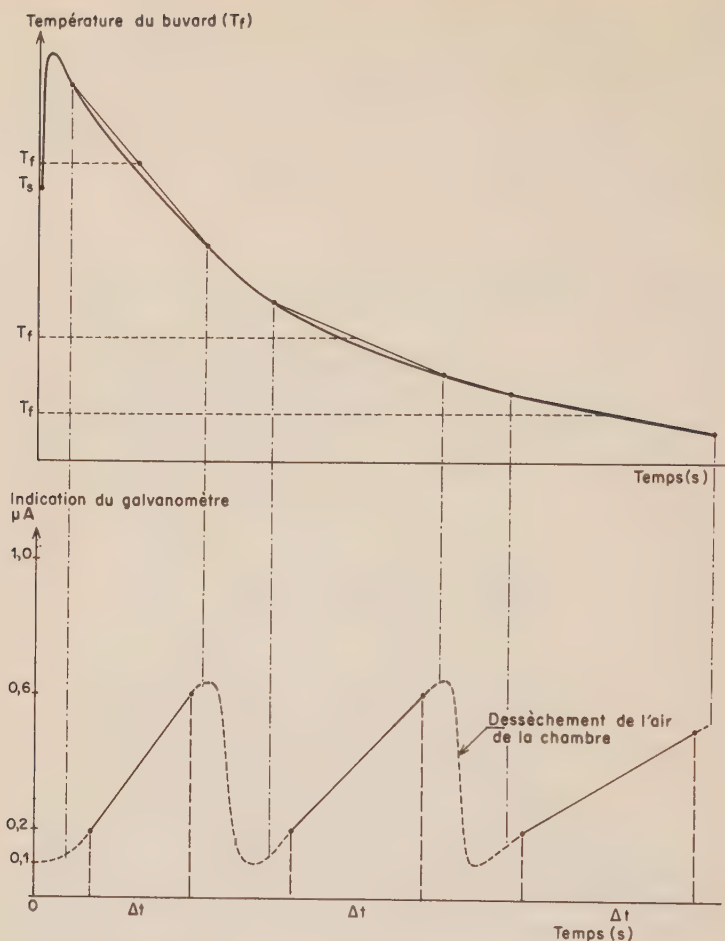


FIG. 8. — Schéma du déroulement des mesures nécessaires à l'étalonnage (obtention de la figure 7).

En bas : variations de la réponse du galvanomètre en fonction du temps lors de trois mesures successives, les valeurs de Δt portées sur la figure 7 sont indiquées en abscisses. En haut : variations de la température de la feuille de papier buvard T_f au cours du temps. On retiendra la valeur moyenne entre les températures mesurées avant et après chaque mesure.

Lorsque l'on place une feuille de papier buvard imbibée d'eau chaude dans la pince, la température de la thermistance (ou du thermocouple) croît instantanément depuis la température de la sonde T_s jusqu'à une température intermédiaire entre celle de l'eau chaude et T_s ; la thermistance et le thermocouple indiquent alors la température de la feuille de papier buvard T_f . T_f décroît très rapidement (graphique supérieur de la figure 8) et devient inférieur à T_s à cause de l'évaporation de l'eau imbibant le buvard.

Pratiquement on a fait des mesures successives sur la même feuille de papier buvard selon une séquence indiquée dans le graphique inférieur de la figure 8 (durée d'utilisation du même buvard, environ 5 minutes). Les températures T_f que l'on

retient dans le dépouillement des opérations d'étalonnage sont égales à la valeur moyenne des températures prises avant et après une mesure (graphique supérieur de la figure 8).

Ces opérations ont été répétées 2 à 4 fois pour chaque température T_s et pour chaque rallonge L .

Ces mesures simultanées de Δt et de T_f pour T_s constant et une rallonge donnée permettent de tracer les courbes $\Delta t = F(T_f)$; on a pour chaque rallonge et pour chaque valeur de T_s une série de points qui peuvent s'aligner sur une droite (fig. 7) quelles que soient la température et la longueur de diffusion L à condition que $T_f \leq T_s$ ou très légèrement supérieur (dans les conditions naturelles on rencontre très rarement $T_f > T_s$). Ces droites ont été tracées à l'aide d'un calculateur par la méthode des moindres carrés. On obtient ainsi les résultats expérimentaux nécessaires aux calculs des termes S et L_0 (§ 23) objectifs de l'étalonnage.

Notons auparavant qu'afin d'obtenir une représentation graphique simple des variations de S (ou de L_0) en fonction de T_s et de T_f (fig. 2 et 3) il est commode d'exprimer T_f en fonction de T_s .

L'équation 1 (§ 23) traduit l'existence d'une relation linéaire entre L et Δt que l'on peut écrire sous la forme :

$$\Delta t = \frac{L}{S} + \frac{L_0}{S} \quad (3)$$

où l'on rappellera que Δt représente le temps nécessaire pour que la réponse de la sonde passe de 0,2 à 0,6 μA , traduisant ainsi les variations d'humidité dans la chambre (en secondes)

L , la longueur de la rallonge (en mètres)

S , la constante instrumentale, fonction de T_s et de T_f (en $m \ s^{-1}$)

L_0 , la longueur de diffusion fictive caractéristique de l'appareil, fonction de T_s et de T_f (en mètres).

Si l'on regroupe les valeurs de Δt obtenues pour une température T_s donnée et pour l'une des températures T_f correspondantes, on peut obtenir directement les valeurs de S et de L_0 (système de n équations (3) à 2 inconnues S et L_0 , n étant égal au nombre de rallonges L utilisées).

Si l'on refait cette opération pour chaque valeur de T_f et de T_s , on obtient toutes les valeurs de S et de L_0 nécessaires à la construction des courbes d'étalonnage (fig. 2 et 3).

5. — PREMIERS RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Les mesures citées à titre d'exemple sont relatives à la feuille supérieure (partie horizontale) d'un blé d'hiver (variété Capitole) au début de l'épiaison; une étude plus complète a été effectuée dans une culture de maïs; elle sera l'objet d'un autre article.

On a déterminé simultanément les résistances stomatiques r_{s_1} (face supérieure) et r_{s_2} (face inférieure) et la valeur du rayonnement incident I arrivant sur un plan parallèle à celui de la feuille.

On définit la résistance stomatique r_s de la feuille à partir des résistances r_{s_1} et r_{s_2} de chacune de ses faces par la relation (définition d'une résistance équivalente) :

$$\frac{1}{r_s} = \frac{1}{r_{s_1}} + \frac{1}{r_{s_2}}$$

Les valeurs extrêmes de r_s que l'on a obtenues sont égales à 75 et 5000 $\text{m}^{-1} \text{s}$; r_s croît toujours au fur et à mesure que l'on descend dans la végétation.

De plus on constate que d'une façon générale r_{s_1} est supérieure à r_{s_2} . Ce fait est à rapprocher de l'inégale répartition des stomates entre les deux faces, celle du dessus ayant une densité de stomates toujours supérieure à celle du dessous : 33 contre 14 par mm^2 (FERRY et WARD, 1959).

La figure 9 montre l'influence du rayonnement solaire (mesuré parallèlement à la feuille) sur la résistance stomatique; on notera la différence entre les valeurs obtenues dans la matinée et celles relevées dans l'après-midi.

Si on admet qu'au cours de la journée la plante se déshydrate lentement, ces courbes montreraient qu'un effet hydrique secondaire se superpose à l'effet photique dominant dans le mécanisme d'ouverture des stomates.

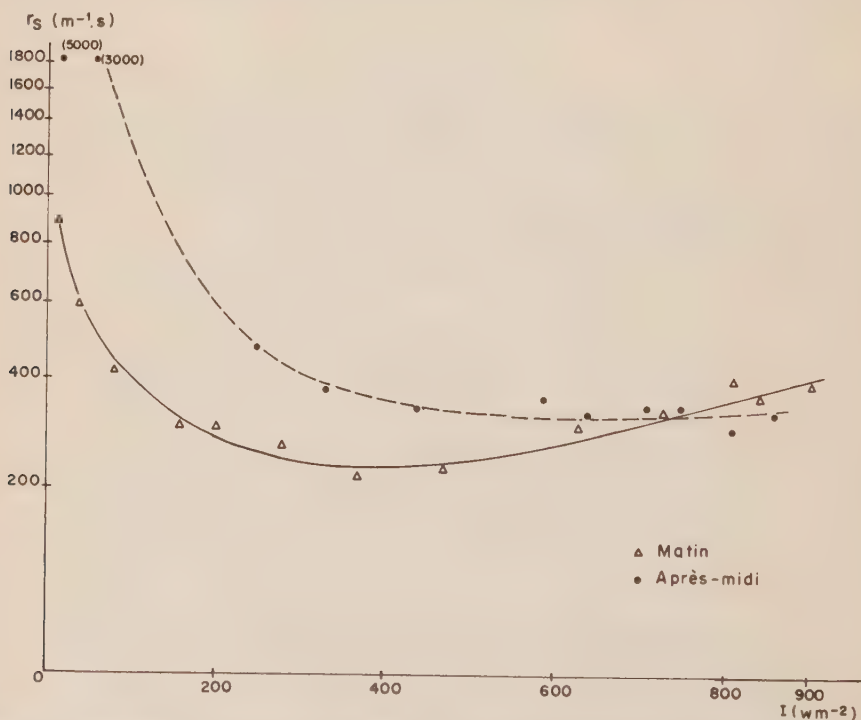


FIG. 9. — Influence du rayonnement solaire sur la résistance stomatique d'une feuille de blé en place.

En ordonnées : résistance stomatique équivalente r_s ; En abscisses : éclaircissement I mesuré parallèlement à la feuille, variété Capitole, au début de l'épiaison, partie horizontale de la feuille supérieure.

La Minière (Yvelines, France) le 10 juin 1969.

6. — CONCLUSION

La méthode de mesure de la résistance stomatique décrite dans cet article est précise (le tableau III fournit des comparaisons avec d'autres méthodes) et commode d'emploi bien que son étalonnage (en dehors de la période de mesure) prenne beaucoup de temps.

On a utilisé cette méthode dans deux buts : le premier consiste à rechercher les causes des variations de la résistance stomatique d'origine physiologique (âge, déficit de saturation des feuilles...) et climatique (rayonnement solaire, évaporation...). Le second est de fournir les valeurs de r_s élément indispensable à l'interprétation ou même au calcul de l'assimilation nette et de l'évapotranspiration réelle d'une culture.

TABLEAU III

Comparaison entre différentes méthodes de mesure de la résistance stomatique

	Chambre de transpiration ou r_s mètre	Comparaison entre transpiration et évaporation (de Parcevaux 1963 1969)	Chambre d'assimilation (Ph. Chartier 1970)
BLE	360	345	
(culture en place	475	520	
début de	810	1 120	
l'épiaison)	1 680	1 660	
HARICOT			
(plantule de 12 jours	126		122
au laboratoire)			

BIBLIOGRAPHIE

- Van BAVEL C.H.M. and al., 1965. — Measuring transpiration resistance of leaves. *Plant Physiology*, **40**, 3, p. 535-540.
- CHARTIER Ph., 1969. — Etude de l'assimilation nette d'une culture couvrante. II. La réponse de l'unité de surface de feuille. *Ann. Physiol. Vég.* (Paris) (sous presse).
- FERRY J.F. and WARD H.S., 1959. — Fundamentals of plant physiology. MacMillan Company, New-York, 288 p.
- GAASTRA P., 1959. — Photosynthesis of crop plants as influenced by light, carbon dioxide, temperature and stomatal diffusion resistance Mededel. Landbouwhogeschool Wageningen, Nederland 59, 13.

- LEMEUR R., 1970. — *In* Rapport d'activité 1969 du Laboratoire d'Ecologie Végétale de la Faculté Agronomique de l'Université de Gand (en Flamand).
- DE PARCEVAUX S., 1963. — Transpiration végétale et production de matière sèche. Essai d'interprétation en fonction des facteurs du milieu. *Ann. Agron.*, **14**, 5, p. 655-672 et In: « L'eau et la production végétale », INRA Paris, 1964, p. 61-150.
- DE PARCEVAUX S., 1969. — Résultat non publié.
- WALLIHAN E.F., 1964. — Modification and use of an electric hygrometer for estimating relative stomatal aperture. *Plant Physiology*, **39**, p. 86-90.

